

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

З.М. ГИЗАТУЛЛИН, Р.М. ГИЗАТУЛЛИН, М.Г. НУРИЕВ

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ

В работе рассматривается применение метода физического моделирования для задач электромагнитной совместимости с участием макрообъектов, для которых возникают трудности с изготовлением макетов и имитаторов поля в реальном масштабе. Представлены базовые выражения для изучения различных электромагнитных явлений, определены основные сложности реализации масштабных макетов и пути их решения. Приведены математические модели и проведен расчет параметров для физического моделирования задач электромагнитной совместимости. Описаны примеры физического моделирования отдельных задач, которые указывают на эффективность данного подхода и определяют возможность его применения для решения аналогичных задач электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: физическое моделирование, электромагнитная совместимость, информационная безопасность, макрообъект, электромагнитное воздействие, математическая модель, методика.

Введение

В настоящее время для решения большого количества практических задач в различных предметных областях человеческой деятельности широкое применение получил метод физического моделирования. Физическое моделирование – метод экспериментального изучения различных физических явлений, основанный на их физическом подобии. Метод состоит в создании лабораторной физической модели явления в уменьшенных масштабах и проведении экспериментов на этой модели. Выводы и данные, полученные в этих экспериментах, затем распространяются на явление в реальных масштабах.

Необходимость применения метода физического моделирования для задач анализа электромагнитной совместимости обусловлена тем, что при изучении электромагнитных процессов, протекающих в различных макрообъектах (например, зданий, объектов энергетики, транспортных средств или др.), возникают трудности с изготовлением макетов, имитаторов поля в реальном масштабе или измерением быстротекущих процессов [1, 2]. Практическая реализация данных задач требует решения вопросов адекватного выбора математических моделей, описывающих электромагнитные поля и помехи, разработки экспериментальных методик и выбора оптимальных параметров физических моделей.

Целью данной работы является разработка математических моделей и описание задач анализа электромагнитной совместимости, решение которых можно эффективно реализовать путем физического моделирования.

Математические модели для физического моделирования задач электромагнитной совместимости

Возможность применения масштабных моделей для физического моделирования электромагнитных задач основано на свойстве линейности уравнений Максвелла и применяется для области линейных свойств материалов [3]. Основные сложности

© З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев
Проблемы энергетики, 2015, № 1-2

реализации масштабных моделей связаны с необходимостью подбора материалов с определенными свойствами. Обычно, в реальных условиях проведения масштабного эксперимента, практически нельзя подобрать материалы с определенными, сильно отличающимися от оригинала диэлектрическими и магнитными свойствами. Поэтому обычно придерживаются следующих выражений:

$$\varepsilon' = k\varepsilon, \quad k=1, \quad \mu' = m\mu, \quad m=1, \quad c = \frac{1}{\sqrt{km}},$$

где $\varepsilon', \varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость материалов модели и оригинала; μ', μ – магнитная проницаемость материалов модели и оригинала; k – коэффициент изменения диэлектрической проницаемости; m – коэффициент изменения магнитной проницаемости; c – коэффициент масштабирования скоростей. Данные условия приводят к тому, что необходимо изменять значение проводимости материалов σ :

$$\sigma' = p\sigma, \quad npt = 1, \quad p = \frac{1}{n},$$

где σ', σ – проводимость материалов модели и оригинала; p – коэффициент изменения проводимости материалов; n – коэффициент изменения геометрических размеров модели. Если не изменять данную проводимость в масштабной модели, т.е. $p = 1$, тогда

$$h = e\sqrt{\frac{p}{mF}},$$

где h – коэффициент изменения напряженности магнитного поля; e – коэффициент изменения напряженности электрического поля; F – коэффициент изменения частоты. Тогда магнитное поле сжимается по отношению к электрическому полю. Поэтому, в идеальном случае, масштабирование активного сопротивления осуществляется путем замены материала оригинала другим материалом с увеличенной в p раз проводимостью. Однако на практике, где правила масштабирования физических размеров являются весьма полезными, активное сопротивление играет не определяющую роль, например, как в случае исследования электромагнитных полей и помех при воздействии разряда молнии [1, 2]. В данном случае, как правило, путь тока молнии лежит через элементы с малыми потерями (например, молниеотводы и др.), активное сопротивление которых пренебрежимо мало. Следовательно, пропорциональное изменение физических размеров модели (l'), при сохранении ее характеристик по электрической и магнитной проницаемости, приводит к пропорциональному изменению величин всех индуктивностей ($L' = nL$) и емкостей ($C' = nC$), которые и являются определяющими при формировании электромагнитных процессов в оригинале и модели.

В таблице представлены математические модели и приведены примеры расчетов параметров для физического моделирования актуальных задач электромагнитной совместимости [2, 3, 4].

Таблица

Математические модели и примеры расчета
коэффициентов физических величин

Физическая величина	Математические модели для физического моделирования (с индексом')	Примеры расчета параметров модели
Геометрические размеры (l)	$l' = nl$	$n = 1/10$ (уменьшение размера модели в 10 раз)

продолжение таблицы

Время (t)	$t' = Tt$	$T = 1/10$
Частота (f)	$f' = Ff ; F = \frac{1}{n}$	$F = 10$
Ток (I)	$I' = AI$	$A = 1/100$
Потенциал (U)	$U' = BU$	$B = 1/100$
Производная от тока по времени	$\frac{dI'}{dt'} = \frac{A}{T} \frac{dI}{dt}$	$\frac{dI'}{dt'} = \frac{1}{10} \frac{dI}{dt}$
Напряженность электрического/магнитного поля в дальней зоне (E/H)	$E' = eE$, $H' = hH$	$e = h = \frac{1}{20}$
Напряженность магнитного поля прямолинейного проводника в дальней зоне (H_{Π})	$H'_{\Pi} = \frac{I'}{2\pi r'} = \frac{AI}{2\pi nr}$, где r – расстояние от проводника до точки наблюдения	$H'_{\Pi} = \frac{1}{10} H_{\Pi}$
Напряженность магнитного поля прямолинейного проводника в ближней зоне ($H_{\Pi Б}$)	$H'_{\Pi Б} = \frac{I' l'}{4\pi r'^2} = \frac{A l n l}{4\pi n^2 r^2}$	$H'_{\Pi Б} = \frac{1}{10} H_{\Pi Б}$
Напряженность магнитного поля катушки (H_K)	$H'_K = I' d = A l d$, где d – количество витков на единицу длины	$H'_K = \frac{1}{100} I d$
Напряженность магнитного поля внутри катушки большой длины (H_C)	$H'_C = \frac{W I'}{l'} = \frac{W A I}{n l}$, W – число витков; l – длина катушки	$H'_C = \frac{1}{10} H_C$
Напряженность электрического поля в ближней зоне (E_B)	$E'_B = e_B E_B$, $H'_B = h_B H_B$	Произвольное, например $e_B = \frac{1}{30}$, $h_B = \frac{1}{50}$
Производная от напряженности магнитного поля	$\frac{dH'}{dt'} = \frac{h}{T} \frac{dH}{dt}$	для дальней зоны $\frac{dH'}{dt'} = \frac{1}{2} \frac{dH}{dt}$, для ближней зоны $\frac{dH'}{dt'} = \frac{1}{5} \frac{dH}{dt}$
Производная от напряженности электрического поля	$\frac{dE'}{dt'} = \frac{e}{T} \frac{dE}{dt}$	для дальней зоны $\frac{dE'}{dt'} = \frac{1}{2} \frac{dE}{dt}$, для ближней зоны $\frac{dE'}{dt'} = \frac{1}{3} \frac{dE}{dt}$

Напряженность магнитного поля при коротком замыкании высоковольтной линии электропередачи ($H_{\text{Л}}$)	$H'_{\text{Л}}(t') = \frac{I'_{\text{КЗ}}(e^{\frac{-t'}{T'C}} - \cos(2\pi f't'))}{2\pi r'} =$ $= \frac{AI_{\text{КЗ}}(e^{\frac{-Tt}{TTC}} - \cos(2\pi FfTt))}{2\pi nr},$ где $I_{\text{КЗ}}$ – ток; T_C – постоянная времени сети (0,05...0,1); f – 50 Гц	$H'_{\text{Л}}(t') = \frac{1}{10} \cdot H_{\text{Л}}(t)$
Напряженность электрического поля контактной сети электротранспорта ($E_{\text{КС}}$)	$E'_{\text{КС}} = \frac{U'}{r'F(\frac{r'}{R'})\ln(\frac{2R'}{r'_{\text{пр}}})} =$ $= \frac{BU}{nrF(\frac{nr}{nR})\ln(\frac{2nR}{nr_{\text{пр}}})},$ где U – потенциал провода; R – высота подвеса провода; $r_{\text{пр}}$ – радиус провода; $F(r/R)$ – функция изменения напряженности [4]	$E'_{\text{КС}} = \frac{1}{10} \cdot E_{\text{КС}}$
Напряженность магнитного поля контактной сети электротранспорта ($H_{\text{КС}}$)	$H'_{\text{КС}} = \frac{I'_{\text{КЗ}}(1 - e^{\frac{-t'}{T'C}})}{2\pi r'} =$ $= \frac{AI_{\text{КЗ}}(1 - e^{\frac{-nt}{nTC}})}{2\pi nr}$	$H'(t')_{\text{КС}} = \frac{1}{10} \cdot H_{\text{КС}}(t)$
Напряжение наводки на антенну в виде симметричного вибратора $U_{\text{А}}(t)$	$U'_{\text{А}}(t') = E'l' = eEnl_{\text{А}},$ где $l_{\text{А}}$ – длина симметричного вибратора	$U'_{\text{А}}(t') = \frac{1}{200} U_{\text{А}}(t)$
Напряжение наводки на рамочную антенну $U_{\text{Р}}(t)$	$U'_{\text{Р}}(t') = \mu_0 \pi r_a^2 \frac{dH'}{dt'} =$ $= \mu_0 \pi n^2 r_a^2 \frac{h_{\text{Б}}}{T} \frac{dH}{dt},$ где $r_{\text{а}}$ – радиус рамки	$U'_{\text{Р}}(t') = \frac{1}{500} U_{\text{Р}}(t)$

Напряжение наводки на контур от влияния магнитного поля $U_H(t)$	$U'_H(t') = \mu_0 a' b' \frac{dH'}{dt'} =$ $= \mu_0 n^2 ab \frac{h_B}{T} \frac{dH}{dt},$ где a, b – размеры приемного контура	$U'_H(t') = \frac{1}{500} U_H(t)$
Напряжение наводки на двухпроводную линию от влияния электрического поля $U_E(t)$	$U'_E(t') = 2C' a' b' R_H \frac{dE'}{dt'} =$ $= 2C n^2 ab R_H \frac{e}{T} \frac{dE}{dT},$ где C – внутренняя емкость двухпроводной линии; R_H – эквивалентное сопротивление	$U'_E(t') = \frac{1}{200} U_E(t)$

Физическое моделирование задач электромагнитной совместимости

В работе [1] предложена методика исследования магнитных полей внутри здания при воздействии разряда молнии на систему молниезащиты на основе физического моделирования. В качестве примера разработан специальный стенд с масштабным макетом здания и внешней системой молниезащиты с четырьмя токоотводами (рис. 1, а). В работе выявлено распределение напряженности магнитного поля внутри здания при воздействии разряда молнии (рис. 1, б) и эффективность экранирования армирующей сетки в стене здания. Оценка точности физического моделирования показывает, что расхождение результатов составляет до 30% (из-за несимметричного подключения генератора – до 10%; нестабильности выходных параметров генератора – до 10%; расхождения между масштабными расчетными и экспериментальными значениями параметров – до 5 %; точности измерительного прибора в данном диапазоне частот – до 5 %). Успешное применение данного подхода позволяет рекомендовать физическое моделирование и для другой аналогичной задачи: исследования электромагнитных полей от отдельно стоящих молниеотводов. Данные результаты позволяют уточнить зоны защиты молниеотводов, возможные уровни электромагнитных полей, в том числе и с учетом объектов в данных зонах.



а)



б)

Рис. 1. Масштабный макет здания (а) и пример распределения магнитного поля внутри здания (б)

Часто задачи электромагнитной совместимости возникают для таких макрообъектов, как транспортные средства, в частности для летательных аппаратов.

Одним из важных факторов, влияющих на безопасность полетов в сложных метеорологических условиях, является поражение летательных аппаратов молнией. В работе [5] представлены математические модели, схемы стендов и методика физического моделирования прямого и косвенного воздействия разряда молнии на летательные аппараты.

Сложность проведения экспериментальных исследований электромагнитной совместимости при участии такого источника, как высоковольтная линия электропередачи (ЛЭП), также, в первую очередь, заключается в изготовлении макетов и имитаторов поля в полном масштабе. Вторая сложность заключается в очень высоких значениях токов и напряжений в рабочем и в наиболее распространенных аварийных режимах. Учитывая данные обстоятельства, в работе [6] рассматривается возможность и предлагается методика физического моделирования электромагнитной обстановки вокруг ЛЭП на основе упрощенного экспериментального стенда. Также в работе даны рекомендации по выбору параметров методики и приведены примеры расчетов. Аналогично могут быть решены и задачи электромагнитной совместимости, связанные с контактной сетью электротранспорта [4].

Одним из перспективных направлений применения физического моделирования является анализ информационной безопасности электронных средств при воздействии локальных преднамеренных электромагнитных источников [7]. Современное состояние данной проблемы имеет не столь развитую теорию и практику, т.к. в данной постановке задача выделена относительно недавно. Данный тип источников может воздействовать электромагнитным полем через сеть электропитания, через металлоконструкции и линии связи [2, 8, 9, 10]. Практически во всех случаях путь электромагнитного воздействия включает макрообъекты, которые затрудняют решение задачи исследования электромагнитной обстановки особенно при существенном увеличении границ и ширины частотного спектра воздействия. Например, в работе [9] предложены математические модели, методика и расчет параметров для физического моделирования электромагнитной обстановки при воздействии генератора тока на систему отопления здания. В качестве примера разработан масштабный макет здания с системой отопления. Выявлено распределение магнитного поля внутри здания, проведена оценка точности моделирования. Другим направлением применения физического моделирования задач информационной безопасности при воздействии локальных преднамеренных электромагнитных источников является устранение трудностей с измерением быстротекущих процессов и расширение границ исследования частотного спектра, например, за счет увеличения геометрических размеров модели исследуемых объектов.

Актуальной задачей применения физического моделирования является анализ информационной безопасности при электромагнитном воздействии импульса ядерного взрыва [2, 11]. На сегодняшний день существует большое количество нормативных документов, регламентирующих испытания на данное воздействие. Данное обстоятельство выводит электромагнитный импульс ядерного взрыва из разряда абстрактных задач на прикладной уровень. Подходы на основе испытаний технических средств являются очень масштабными и достаточно сложными вне специализированных полигонов. Размеры данных установок составляют до нескольких сот метров. Поэтому широкое применение предлагаемых математических моделей и методики физического моделирования позволяют существенно упростить данные исследования.

Выводы по работе

Физическое моделирование, основанное на предложенных в работе

математических моделях, позволяет эффективно исследовать определенные задачи электромагнитной совместимости, в решении которых участвуют макрообъекты. В работе описаны задачи физического моделирования магнитных полей внутри здания при воздействии разряда молнии на систему молниезащиты, воздействия разряда молнии на летательные аппараты, исследования электромагнитной обстановки вокруг линии электропередач, электромагнитной обстановки при воздействии локальных преднамеренных электромагнитных источников, в частности, по металлоконструкции здания.

Реализация отдельных примеров позволяет утверждать о практической пригодности данного подхода для решения подобных задач, выявить достоинства и недостатки, определить трудности реализации и оценить точность исследований (расхождение до 30%).

В перспективе, на основе предложенных математических моделей и методик, видится применение физического моделирования для задач электромагнитной совместимости, связанных с контактной сетью электротранспорта, электромагнитным воздействием импульса ядерного взрыва и др. Также, с целью упрощения анализа и повышения точности исследований на определенных этапах, данный подход может использоваться в составе методики сквозного прогнозирования, представленной в работах [10, 12].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-01-31098 мол_а.

Summary

The use of physical modeling for electromagnetic compatibility problems with macroscopic objects for which there are difficulties with the production of models and simulators field real is presented in the article. The paper presents the basic expressions for the study of various electromagnetic phenomena, identified the main challenges of large-scale models and ways of solving them. Mathematical models and calculated parameters for the physical modeling of electromagnetic compatibility is presented. Describes examples of physical modeling of individual tasks, which indicate the effectiveness of this approach and determine its applicability to solve similar problems of electromagnetic compatibility. The reported study was supported by RFBR, research project No. 14-01-31098 мол_а".

Keywords: *physical simulation, electromagnetic compatibility, information security, macroobject, electromagnetic interference, mathematical model, methodology.*

Литература

1. Гизатуллин З.М. Анализ магнитных полей при воздействии разряда молнии на внешнюю систему молниезащиты здания // Технологии электромагнитной совместимости. 2010. №3. С. 30–36.
2. Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях: монография. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. 254 с.
3. Schumacher C.R. Electrodynamic similitude and physical scale modeling of nondispersive targets // Journal of Applied Physics. 1987. Vol. 62, No. 7. pp. 2616–2625.
4. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под ред. В.И. Кравченко. М.: Радио и связь, 1987. 256 с.
5. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Физическое моделирование воздействия разряда молнии на летательные аппараты // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. С. 254–257.

6. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Зиятдинов И.Н., Нуриев М.Г. Моделирование электромагнитных полей линий электропередач на основе теории масштабного эксперимента // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. труд. Междунар. науч.-практ. конф. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2014. С. 269–272.

7. ГОСТ Р 51275-2007. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2007. 11 с.

8. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Исследование электромагнитной совместимости локальных вычислительных сетей при наносекундных электромагнитных воздействиях // Радиотехника и электроника. 2014. №5. С. 19–22.

9. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Моделирование электромагнитной обстановки на основе теории масштабного эксперимента для задач электромагнитной совместимости и защиты информации // Информационные технологии. 2013. №4. С. 19–22.

10. Гизатуллин Р.М. Сквозное прогнозирование помехоустойчивости вычислительной техники внутри зданий при кондуктивных электромагнитных воздействиях по сети питания // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. №5-6. С. 45–53.

11. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 478 с.

12. Гизатуллин З.М. Сквозное прогнозирование электромагнитной совместимости электронно-вычислительных средств внутри зданий при внешних электромагнитных воздействиях // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2011. №2. С. 123–128.

Поступила в редакцию

03 сентября 2014 г.

Гизатуллин Зиннур Марселевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационные технологии проектирования электронно-вычислительных средств» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). Тел: 8(843)231-00-81, 8(903)0617176. E-mail: gzm_zinnur@mail.ru.

Гизатуллин Рифнур Марселевич – младший научный сотрудник Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). E-mail: grm444@mail.ru.

Нуриев Марат Гумерович – аспирант кафедры «Информационные технологии проектирования электронно-вычислительных средств» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). Тел: 8(843)231-00-81. E-mail: marat_nul@mail.ru.